ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 004.94:621.78

А.А.ЛАВРЕНТЬЕВ, И.Е.РОГОВ, С.Д.АНИСИМОВ, В.С.КОВАЛЕВА

ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ УПРОЧНЕНИИ

Проведены экспериментальные исследования распределения физико-механических и электромагнитных свойств по толщине изделия. Определены стандартизованные эпюры распределения свойств изделия. Определяются параметры имитационной модели многослойной проводящей ферромагнитной среды для получения оптимальной точности моделирования.
Ключевые слова: *имитационная модель, упрочненный слой, образец.*

Введение. Любая поверхностная обработка материала подразумевает некоторое изменение его свойств в поверхностном слое определенной толщины по отношению ко всему оставшемуся объему основного материала. Однако резкой границы перехода от упрочненного слоя к неупрочненной основе не существует. Свойства самого упрочненного слоя также могут изменяться по глубине, так как любая поверхностная обработка действует с поверхности изделия вглубь.

С целью изучения распределения электромагнитных и физико-механических свойств по толщине поверхностно упрочненного изделия были проведены следующие исследования.

Экспериментальные исследования. Измерения распределения электромагнитных свойств 18 образцов из стали 40ХНМА, упрочненных наклепом, по глубине, а также толщины упрочненного слоя производились при послойном стравливании участка наклепанного образца изделия с последующим измерением ЭДС электромагнитного преобразователя на образце. Поскольку как электромагнитные, так и физико-механические свойства изделия определяются его структурой, можно считать, что изменяющимся по толщине образца электромагнитным свойствам соответствует упрочненный слой, физико-механические свойства которого изменяются. При достижении неупрочненной основы изменение электромагнитных свойств изделия так же, как и физико-механических, прекращается.

Толщина снятого слоя определялась микрометром относительно базовой плоскости 4 – торцевой поверхности специальной цилиндрической вставкой 3, приклеенной с внутренней стороны образца 1 (рис.1). Образец погружался в электролит таким образом, чтобы базовая поверхность оставалась не погруженной.

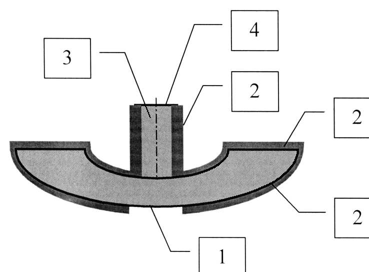


Рис.1. Конфигурация образца, подвергаемого травлению

Остальная часть образца (кроме исследуемого участка поверхности 1), покрывалась кислото- и теплостойким лаком 2. Каждый раз после снятия очередного слоя металла температура образца стабилизировалась в водяной ванне, что исключало влияние колебаний температуры образца на сигнал электромагнитного преобразователя. После чего измерялся сигнал накладного П-образного датчика, включенного по схеме (рис.2), где Г – синусоидальный генератор частотой 20 кГц; $Д_1$ и $Д_2$ – датчики, включенные по дифференциальной схеме; Ф – измеритель разности фаз; V – вольтметр.

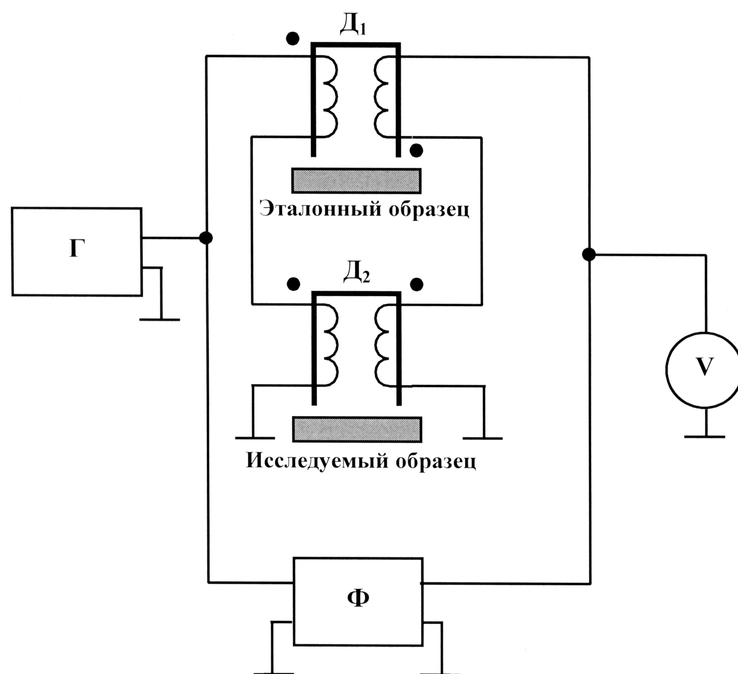


Рис.2. Функциональная схема измерения АФЧХ образцов

Проведенные измерения позволили получить зависимость комплексного напряжения $\dot{U}_i$ ($\dot{U}_i = U_i \cdot \cos\varphi_i + j \cdot U_i \cdot \sin\varphi_i$, где U – измеренное напряжение и φ – сдвиг фаз между сигналами генератора и датчика) от толщины стравленного слоя. По данным измерений строился график $\dot{U}_i = f(h)$, отображающий изменение сигнала электромагнитного преобразователя по глубине упрочненного слоя. Поскольку влияние остальных факторов было исключено, электромагнитный сигнал в этом случае зависел от магнитной проницаемости $\dot{\mu}$ и электропроводности σ тонкого поверхностного слоя исследуемого образца.

Примеры экспериментально полученных графиков зависимостей $\dot{U}_i = f(h)$ приведены на рис.3.

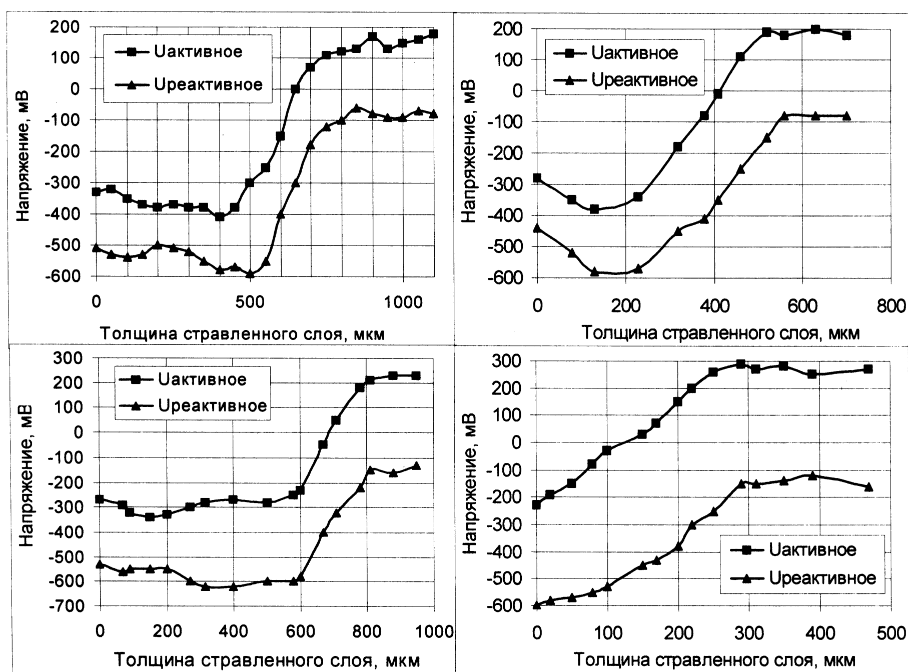


Рис.3. Пример АФЧХ распределения сигнала датчика по толщине образца

Кроме того, на аналогичных образцах измерялось распределение остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя (эпюры остаточных напряжений). Измерение производилось на московском вертолетном заводе по действующей на заводе методике. Некоторые из полученных эпюр приведены на рис.4.

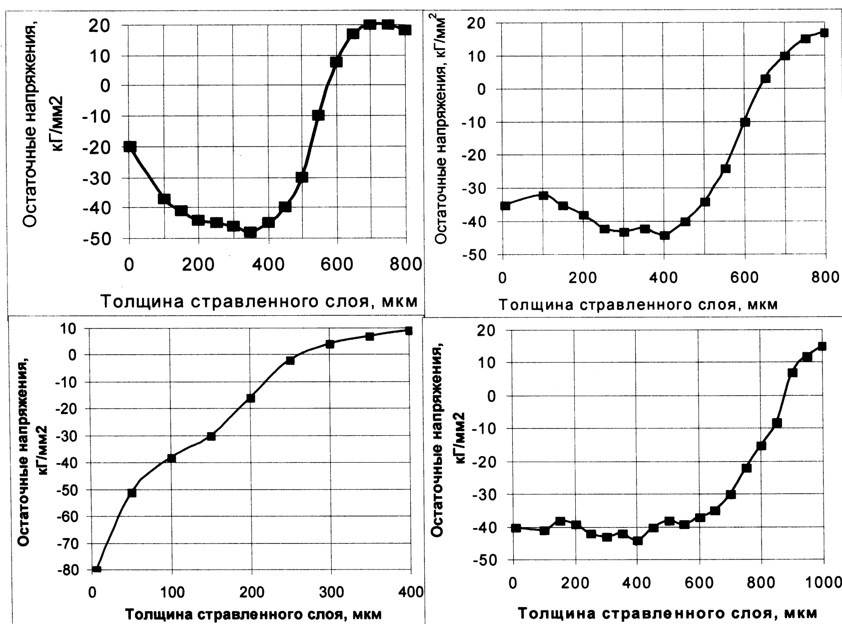


Рис.4. Эпюры распределения остаточных напряжений по толщине образцов

Анализ рис.3 и 4 позволяет сделать следующие выводы:

1. Изменения электромагнитных свойств изделия по толщине аналогично изменению его физико-механических свойств.
2. Упрочненный поверхностный слой не имеет резкой границы, отделяющей его от основного материала.
3. На каждом графике можно выделить три области (слоя) с различными характеристиками: упрочненный слой, неупрочненная основа и переходный слой: от упрочненного металла к «сырому».

Обсуждение результатов экспериментов. Все варианты зависимости изменения электромагнитных и физико-механических свойств по толщине изделия можно свести к трем типовым, показанным на рис.5. Они отражают все три основных слоя: упрочненный, с неизменным значением параметра упрочнения $Z_у$ по всей толщине и толщиной $h_у$; неупрочненная основа со значением параметра упрочнения $Z_о$, начинающийся с глубины $h_о$, и переходный, лежащий между значениями глубин $h_у$ и $h_о$. Вариант, показанный на рис.5,б, отличается отсутствием протяженного упрочненного слоя ($h_у$=0) и состоит только из переходного слоя и неупрочненной основы. На рис.5,в появляется участок на поверхности изделия толщиной $h_р$, в котором произошло разупрочнение до значения $Z_р$.

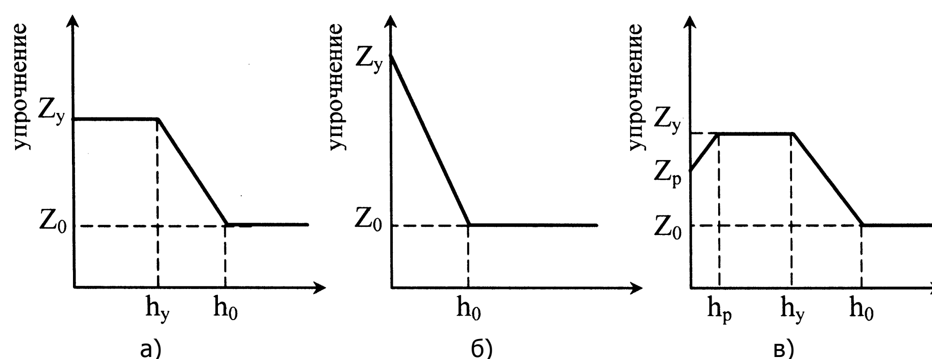


Рис. 5. Типовые зависимости распределения параметра упрочнения по толщине изделия

Зависимость на рис.5,а соответствует нормальному упрочнению и характерна для нормального технологического процесса. Величина $h_у$ показывает толщину слоя неизмененной (реально – практически неизменной). Значение $h_о$ соответствует толщине упрочненного слоя (обычно согласно ТУ, упрочненным слоем считают слой, имеющий физико-механические свойства, отличные от основного материала).

Зависимость на рис.5,б соответствует упрочнению, произведенному с интенсивностью большей номинальной. Если толщина упрочненного слоя $h_у$ лежит в заданных конструкторской документацией пределах, то это может считаться нормой. Если же по какой-либо причине оказывается $h_у<h_{у\,min}$ (например, при высокой твердости исходного материала), то получается исправимый брак.

Зависимость на рис.5,в характерна для длительного упрочнения недостаточной интенсивности. Также такой случай возможен при исправлении брака с эпюрой, показанной на рис.5,б. В этом случае толщина слоя h_y обычно получается больше номинальной, но в тонком поверхностном слое h_p происходит разупрочнение материала. Если при этом величина упрочнения на поверхности Z_p не выходит из допустимых пределов, то ситуация является нормой. Если же величина Z_p оказывается слишком мала, то исправить такой брак значительно труднее, чем в предыдущем случае.

Применение результатов в моделировании. Для отражения основных видов эпюр в имитационной модели [1] принимаем следующую пространственную модель строения изделия (рис.6). Следует помнить, что при упрочнении параметры качества изделия увеличиваются, а значения электропроводимости и магнитной проницаемости обычно уменьшаются. Все изделие разбивается по толщине на N одинаковых слоев, причем N должно быть достаточно велико, чтобы ступенчатая аппроксимация электромагнитных свойств изделия (см.рис.6) мало отличалась от линейной. При выводе уравнений электромагнитного преобразователя [1] предполагалось, что ось X пространственных координат направлена от поверхности в глубь контролируемого изделия. Поэтому в моделировании «углубление» в изделие и толщина слоя обозначаются координатами по этой оси.

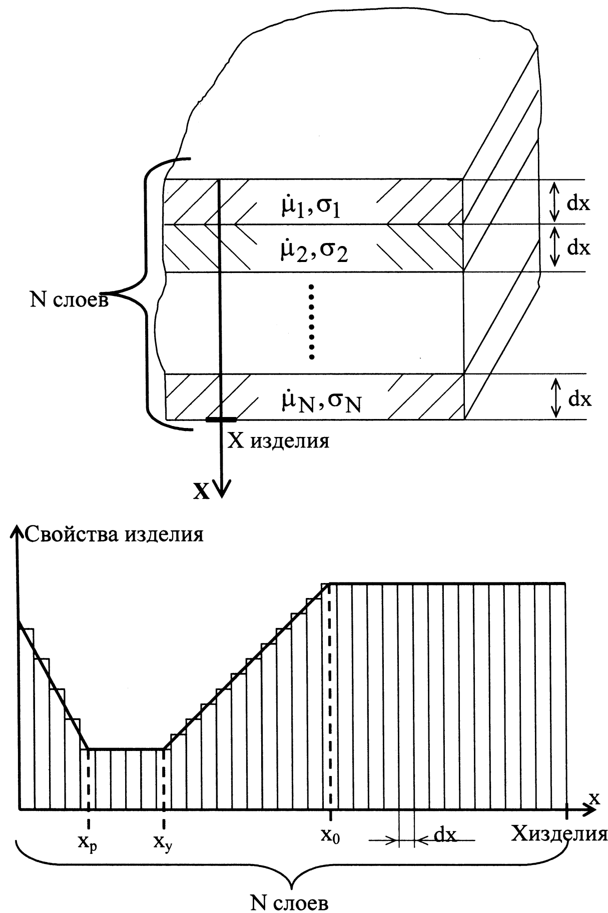


Рис.6. Пространственная модель строения изделия

На рис.7 показано распределение напряженности магнитного поля по толщине для однородного изделия. Оно подчиняется закону:

$$H = H_0 \cdot e^{-\dot{c}x}, \qquad (1)$$

где H_0 – напряженность магнитного поля на поверхности изделия; $\dot{c} = \sqrt{j\omega \cdot \dot{\mu} \cdot \mu_0 \cdot \sigma}$ – постоянная распространения; ω – частота тока возбуждения датчика; $\dot{\mu}$ – комплексная магнитная проницаемость изделия; σ – электропроводность изделия.

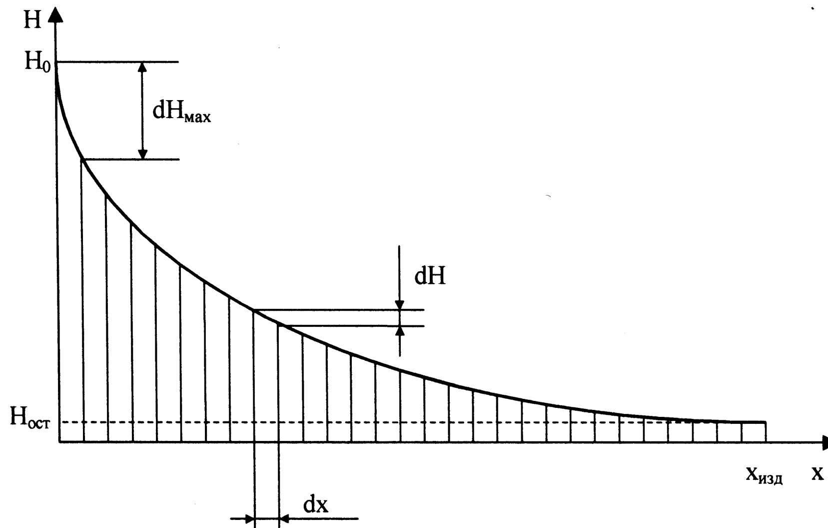


Рис.7. Распределение магнитного поля в изделии

Магнитный поток в изделии и сердечнике датчика вычисляется интегрированием по толщине изделия. Поэтому толщина одного слоя разбиения dx должна быть достаточно мала, чтобы изменение величины напряженности поля dH_{max} при переходе от слоя к слою также было малым. Однако при слишком большом числе слоев резко растет вычислительная ошибка и продолжительность вычислений, следовательно, требуется оптимизация числа слоев для минимизации погрешности моделирования.

Зная толщину изделия $x_{изделия}$ и максимально допустимую величину dH_{max}, можно определить требуемое количество слоев N:

$$N \geq \frac{x_{изделия}}{dH_{max}}.$$

Толщина изделия при моделировании определяется из следующих соображений. Уравнение ЭДС датчика [2] составлены в предположении, что изделие имеет бесконечно большую толщину и отраженная от задней границы электромагнитная волна имеет нулевую амплитуду. Это возможно только при $x_{изделия} \to \infty$. Однако реальное изделие имеет конечную толщину. Кроме того, количество слоев, на которые разбивается изделие, также должно быть конечным. Поэтому толщину изделия $x_{изделия}$ определяют

исходя из допустимого затухания электромагнитного поля в образце. Так как толщина реального образца конечна, то напряженность поля у задней границы изделия $H_{ост.}$ не равна нулю. Здесь электромагнитное поле отражается от границы изделие – окружающая среда и возвращается назад к поверхности. При этом поле снова ослабляется, и напряженность магнитного поля отраженной волны:

$$H_{отр} = H_{ост} \cdot e^{-\dot{c}(x_{изделия} - x)}. \qquad (2)$$

Следовательно, толщина изделия $x_{изделия}$ должна выбираться таким образом, чтобы $H_{ост.} << H_o$, при этом ошибка тем меньше, чем лучше это условие выполняется.

На рис.8 показана номограмма для определения толщины моделируемого образца $x_{изделия}$ по заданной ошибке, вызванной конечным затуханием электромагнитного поля в образце.

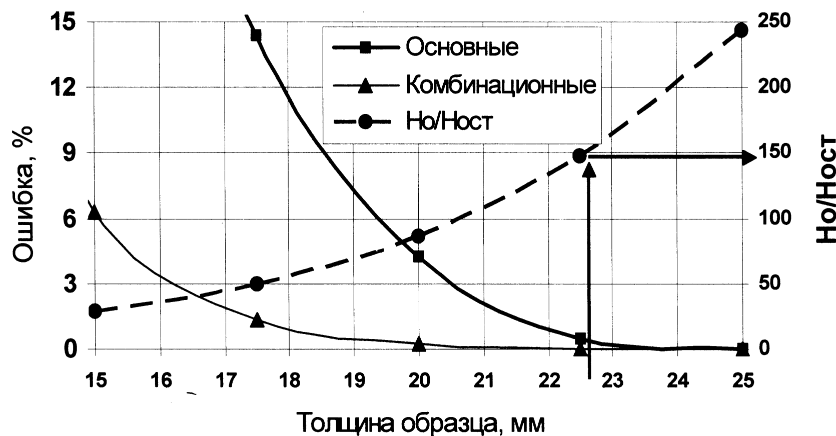


Рис.8. Зависимость ЭДС основных и комбинационных колебаний сигнала датчика от толщины контролируемого изделия при неизменной толщине слоя

При определенной толщине изделия величина ошибки для основных и комбинационных колебаний перестает изменяться. Это значение толщины изделия $x_{изд.\ min}$ можно считать минимально допустимым. Однако использовать полученную таким образом величину $x_{изд.\ min}$ в чистом виде нельзя, так как при изменении электромагнитных свойств изделия или частоты тока, возбуждающего датчик, изменится и затухание в материале изделия. Поэтому из рис.8 находим минимальное затухание сигнала: $\frac{H_o}{H_{ост}} min$. Для ошибки порядка 0,5% это отношение приблизительно равно 150 для основных колебаний и 70 для комбинационных (см.рис.8).

Величина затухания электромагнитного поля зависит от частоты сигнала, магнитной проницаемости и электропроводности металла, поэтому данные, приведенные на рис.8, соответствуют частотам, использовавшимся для моделирования: частота основных колебаний (наиболее низкая) – 90 Гц, комбинационных колебаний – 520 Гц [3]. Для других значений частот, исходя из (1), пропорционально изменятся лишь соответствующие значения толщины образца, т.е. масштаб по оси абсцисс на рис.8.

Следовательно, толщина образца при моделировании должна выбираться таким образом, чтобы на самой низкой частоте отношение напряженности поля в первом слое и напряженности поля последнего слоя было не меньше 150 для величины ошибки, вызванной конечным затуханием поля в образце, не превышающем 0,5%.

Аналогичным образом (рис.9) выбирается минимальное количество слоев, на которые необходимо разбить исследуемый образец, чтобы погрешность, вызванная дискретным изменением напряженности магнитного поля H при переходе от одного слоя к другому, была минимальна.

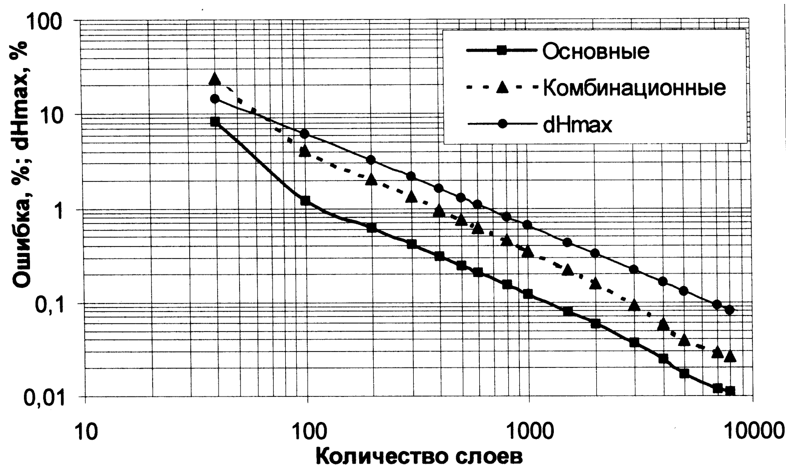


Рис.9. Зависимость ЭДС датчика от количества слоев
при неизменной толщине изделия

При определении оптимальных условий моделирования следует помнить, что эти оба вида погрешности (рис.8, 9) независимы и суммируются.

Заключение. Таким образом, найденные значения минимально допустимого затухания электромагнитного поля в изделии и максимально допустимого изменения напряженности поля при переходе от одного слоя с заданным набором электромагнитных свойств к соседнему позволяют при имитационном моделировании получить оптимальную модель упрочненного слоя.

Библиографический список

1. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование: Теория и технологии. / И.Ю. Рыжиков. – М.: Альтекс, 2004. – 384 с.

2. Создание математической модели и программы ЭВМ для расчета комбинационных колебаний сигналов электромагнитных датчиков: отчет о НИР по гранту фундаментальных исследований в области энергетики и электротехники – Ростов-на-Дону, 2001. – 16 – Исполнители: Анисимов С.Д., Ананченко Л.Н., Рогов И.Е., Голубова Г.С., Виноградова И.Ю. – № ГР 01.980006915, инв. № 02200300133.

3. Анисимов С.Д. Электромагнитный неразрушающий контроль упрочненного слоя на поверхности стальных изделий. / С.Д.Анисимов, Л.Н.Ананченко, И.Ю.Виноградова, И.Е.Рогов // Дефектоскопия. – 2000. – №1. – С. 18-30.

Материал поступил в редакцию 13.02.09.

A.A.LAVRENTYEV, I.E.ROGOV, S.D.ANISIMOV, V.S.KOVALEVA

THE OPTIMIZATION OF THE MODEL OF THE STRENGTHENED LAYER BY THE SURFACE STRENGTHENING

The parameters of the imitative model of multilayer conductive ferromagnetic media to achieve the optimal precision of modeling are determined.
The experimental investigation of the distribution of physicomechanical and electromagnetic properties along the thickness of the sample have been carried out. The standard epures of these properties were determined. The parameters of the imitative model of the multilayer conductive ferromagnetic media to achieve the optimal precision of modeling are determined.

ЛАВРЕНТЬЕВ Анатолий Александрович (р.1952), заведующий кафедрой «Электротехника и электроника» ДГТУ, доктор физико-математических наук (2001), профессор (2003). Окончил физический факультет Ростовского-на-Дону государственного университета (1974).
Область научных интересов: моделирование электронно-энергетической структуры сложных полупроводниковых соединений и некоторых металлических сплавов, имитационное моделирование в структуроскопии.
Автор более 150 научных публикаций.

АНИСИМОВ Сергей Дмитриевич (р.1935), доцент кафедры «Электротехника и электроника» ДГТУ (1971), кандидат технических наук (1966). Окончил факультет «Приборостроение» Таганрогского радиотехнического института (1959).
Область научных интересов – методы неразрушающего электромагнитного контроля.
Автор 120 научных публикаций и 8 изобретений.

РОГОВ Игорь Евгеньевич (р.1964), старший преподаватель кафедры «Электротехника и электроника» ДГТУ (1994). Окончил факультет «Приборостроение» РИСХМ (1986).
Область научных интересов: методы неразрушающего электромагнитного контроля, имитационное моделирование в структуроскопии.
Автор более 50 научных публикаций и изобретений.

КОВАЛЕВА Валентина Сергеевна, доцент кафедры «Физика» ДГТУ. Окончила физический факультет Ростовского-на-Дону государственного университета (1976).
Научное направление – моделирование электронно-энергетической структуры сложных соединений и сплавов.
Автор более 50 научных работ.

alavrentyev@dstu.edu.ru